

**DEKOLORISASI FOTOKATALITIK ZAT WARNA *REMAZOL BLACK 5* DENGAN MENGGUNAKAN NANOPARTIKEL  $\text{TiO}_2$  DAN Ag YANG TERIMMOBILISASI PADA *NANOFIBER* SELULOSA BAKTERIAL (SB)**  
*PHOTOCATALYTIC DECOLORIZATION OF REMAZOL BLACK 5 BY USING  $\text{TiO}_2$  DAN Ag NANOPARTICLE IMMOBILIZED IN BACTERIAL CELLULOSE NANOFIBER*

Srie Gustiani,<sup>1</sup> Suprihanto Notodarmodjo,<sup>2</sup> Mindryani Syafila,<sup>2</sup> Cintya L. Radiman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Balai Besar Tekstil, Jalan Jenderal Ahmad Yani No. 390 Bandung  
E-mail: texirdti@bdg.centrin.net.id

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesa 10, Bandung E-mail: ftsl@bdg.itb.ac.id

<sup>3</sup>Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesa 10, Bandung E-mail: cynthia@chem.itb.ac.id

Tanggal diterima: 2 Oktober 2014, direvisi: 30 Oktober 2014, disetujui terbit: 17 Nopember 2014

**ABSTRAK**

Pada penelitian ini, dilakukan studi terhadap penyisihan zat warna reaktif Remazol Black 5 (RB 5) pada aplikasi proses fotokatalitik menggunakan katalis Ag dan  $\text{TiO}_2$  terimmobilisasi pada permukaan *nanofiber* selulosa bakterial (SB). Metode penelitian meliputi percobaan untuk memperoleh nilai optimum dari pH, jumlah Ag dan  $\text{TiO}_2$  serta untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan warna yang optimum. Pada proses pengolahan RB5, digunakan reaktor fotokatalitik selulosa bakterial (SB)/Ag/ $\text{TiO}_2$  didesain dalam skala laboratorium pada sistem *batch*, konsentrasi warna limbah buatan 10, 30 dan 50 mg/L, intensitas lampu UV 4,5 W/cm<sup>2</sup> selama 120 menit. Dari hasil pengolahan RB 5, diperoleh pH optimum 11, konsentrasi warna 10 mg/l dan jumlah katalis Ag dan  $\text{TiO}_2$  optimum 3,85 mg/cm<sup>2</sup>. Efisiensi penyisihan warna optimum diperoleh sebesar 98,4%.

**Kata kunci:** limbah, selulosa bakterial, tekstil, perak, titanium dioksida.

**ABSTRACT**

*In this research, study of the color removal of reactive dyes Remazol Black 5 (RB 5) in the application of photocatalyst process by using bacterial cellulose nanofiber immobilized Ag and  $\text{TiO}_2$  catalyst was carried out. Research methods include experiments to obtain the optimum pH, the amount of Ag dan  $\text{TiO}_2$  and optimum color removal efficiency. In the processing of RB5, using bacterial cellulose (BC) in photocatalyst BC/Ag/ $\text{TiO}_2$  laboratory scale reactor in operational batch system, dye concentration 10, 30 and 50 mg/L, UV lamp intensity 4.5 W/m<sup>2</sup> for 120 minutes. The results showed the optimum pH at 11 and amount of Ag and  $\text{TiO}_2$  catalyst used in the treatment of RB5 were 3.85 mg/cm<sup>2</sup>. The optimized color removal efficiency of 98.4% was obtained.*

**Keywords:** wastewater, bacterial cellulose, textile, silver, titanium dioxide.

**PENDAHULUAN**

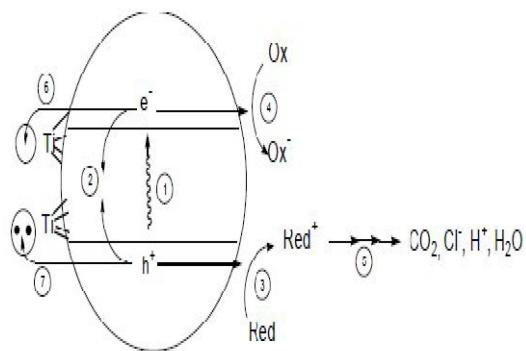
Kegiatan industri tekstil menghasilkan buangan, salah satunya berupa limbah cair berwarna dari proses pencelupan. Air limbah warna dari proses pencelupan, apabila dibuang langsung ke badan air penerima tanpa diolah terlebih dahulu dapat memberikan dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Komponen warna dan garam-garam anorganik terkandung dalam jumlah yang cukup besar di dalam limbah cair tekstil.<sup>1</sup> Dengan demikian, walaupun di Indonesia warna tidak

dimasukkan sebagai parameter yang diatur, tetapi tetap harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke badan air penerima.

Zat warna banyak digunakan pada proses tekstil salah satunya adalah pada proses pencelupan.<sup>2</sup> Zat warna yang banyak digunakan pada proses pencelupan tekstil adalah zat warna azo. Sekitar 2%-50% zat warna yang digunakan pada proses pencelupan, tidak menempel pada serat sehingga masuk ke dalam lingkungan melalui air limbah yang dihasilkan.<sup>2</sup> Metode pengolahan air limbah yang biasa digunakan diantaranya adalah

adsorpsi, proses biologi, klorinasi atau ozonisasi, namun tidak cukup efisien di dalam mengolah senyawa organik pada limbah cair tekstil berwarna.<sup>1</sup> Teknologi pengolahan lanjut seperti *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) merupakan salah satu teknologi yang menjanjikan untuk mendegradasi senyawa organik, anorganik serta warna pada air limbah.<sup>1</sup>

Salah satu metode AOPs adalah fotokatalitik,<sup>3,4,5,6,7,8</sup> didefinisikan sebagai reaksi fotoinduksi yang diakselerasi oleh adanya katalis.<sup>9,10</sup> Jika suatu semikonduktor dikenai cahaya ( $h\nu$ ) dengan energi yang sesuai, maka elektron ( $e^-$ ) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif (*hole*, disingkat sebagai  $h^+$ ) pada pita valensi. Sebagian besar pasangan  $e^-$  dan  $h^+$  ini akan mengalami rekombinasi kembali, baik di permukaan atau di dalam *bulk* partikel. Sementara itu sebagian pasangan  $e^-$  dan  $h^+$  dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor. Dimana  $h^+$  dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak  $e^-$  akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada di sekitar permukaan semikonduktor.<sup>11</sup> Oksidasi ion  $OH^-$  dari  $H_2O$  membentuk radikal OH, setelah suatu  $TiO_2$  menyerap cahaya membentuk *hole*. Radikal OH bersifat aktif dan dapat berlanjut untuk menguraikan senyawa organik target. Skema pembentukan spesies pengoksidasi pada reaksi fotokatalis  $TiO_2$  dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Skematis pembentukan spesies pengoksidasi pada reaksi fotokatalitik  $TiO_2$ .<sup>12</sup>

Pada awalnya penelitian mengenai proses fotokatalitik menggunakan katalis tersuspensi. Sylwia dkk., (2009) melakukan penelitian mengenai proses desinfeksi secara fotokatalitik menggunakan komposit katalis Ag dan  $TiO_2$  secara tersuspensi. Proses fotokatalitik secara tersuspensi memiliki kelemahan yaitu pada penggunaan katalis tersuspensi harus dilakukan proses pemisahan dan pemulihan katalis untuk digunakan kembali.<sup>13</sup> Untuk mengatasi permasalahan tersebut, saat ini banyak penelitian yang dilakukan mengenai peningkatan performa dalam aplikasi pengolahan

air limbah secara fotokatalitik. Upaya peningkatan yang dilakukan dengan cara immobilisasi nanopartikel pada lapisan tipis, efektif untuk degradasi warna dan organik.<sup>14</sup> Beberapa penelitian telah dilakukan sebelumnya, mengenai immobilisasi nanopartikel pada lapisan tipis. Mahmoodi dkk., (2007) melakukan penelitian mengenai lapisan tipis terimmobilisasi nanopartikel  $TiO_2$ , efektif digunakan untuk mendegradasi fenitrothion secara fotokatalitik.<sup>15</sup> Sugiyana, (2013) melakukan degradasi fotokatalitik terhadap limbah cair efluen IPAL tekstil menggunakan komposit *nanofiber* nanopartikel  $TiO_2$  terimmobilisasi.<sup>16</sup>

Pada beberapa penelitian terdahulu, telah dilakukan modifikasi elektronik permukaan semikonduktor melalui deposisi logam mulia. Penambahan logam mulia bertujuan untuk dapat meningkatkan kinerja proses fotokatalitik. Hal tersebut dapat terjadi karena logam mulia dapat membantu mencegah terjadinya rekombinasi elektron pada saat semikonduktor diakselerasi oleh sinar foton.<sup>11</sup>

Logam mulia yang umum untuk digunakan sebagai katalis diantaranya, yaitu Pt, Ag, Au, Cu, Pd, Ni, Co dan Sn. Susanti, (2012) telah melakukan penelitian mengenai proses sintesis  $TiO_2$  dengan menambahkan Ag pada permukaan semikonduktor  $TiO_2$ , untuk diaplikasikan pada proses fotokatalitik.<sup>17</sup>

Pada penelitian ini, dilakukan studi terhadap penyisihan zat warna reaktif *Remazol Black 5* (RB 5) melalui proses degradasi fotokatalitik menggunakan nanopartikel  $TiO_2/Ag$  terimmobilisasi pada lapisan tipis dan efektifitasnya dalam dekolourisasi air limbah warna. Lapisan tipis yang digunakan yaitu selulosa bakterial (SB). SB digunakan karena ketersediaan air kelapa di Indonesia cukup banyak yaitu mencapai 900 juta liter/tahun.<sup>18</sup>

## METODE

### Bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi serat nano SB (sebagai tempat melekatnya nanopartikel  $TiO_2$  dan Ag), Ag yang digunakan berupa *nanopowder* yang memiliki ukuran partikel  $<100$  nm berbasis 99,5% *trace metal* diperoleh dari Sigma-Aldrich,  $TiO_2$  yang digunakan adalah titanium (IV) oxide *nano powder* 99,7% yang memiliki ukuran rata-rata partikel 5 nm diperoleh dari Sigma-Aldrich, zat kimia untuk membuat limbah artifisial dan reagen. Zat kimia yang digunakan, meliputi zat warna *Remazol Black 5* (RB 5) diperoleh dari Dye Star.

### Alat yang digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas dan non gelas. Peralatan

non gelas meliputi reaktor, neraca analitik type SBA-31 (Denver instrument company AA-200), hot plate (Heidolph MR 2002) untuk membuat air limbah buatan, spektrofotometer (Thermo Spectronic 20) untuk mengukur absorbansi larutan warna, lemari pendingin menyimpan limbah buatan, intensitas lampu UV-C 4,5 W/m<sup>2</sup> dengan panjang gelombang 365 nm untuk proses pengolahan air limbah warna, pH meter (pHep by HANNA).

### Preparasi sintesis nanofiber SB/Ag/TiO<sub>2</sub>

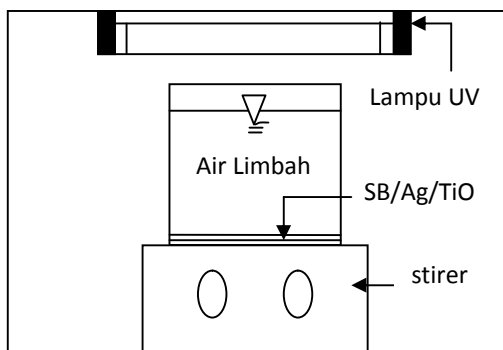
*Nanofiber* yang digunakan adalah jenis *flat sheet* dari selulosa bakterial (nata de coco yang dikeringkan). *Nanofiber* yang digunakan merupakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.<sup>19</sup> *Nanofiber* digunakan sebagai tempat melekatnya nanopartikel TiO<sub>2</sub> dan Ag.

*Nanofiber* diperoleh melalui metode pelapisan, yaitu nanopartikel Ag dan TiO<sub>2</sub> yang terimmobilisasi pada SB. Beberapa variasi konsentrasi Ag dan TiO<sub>2</sub> dibuat dengan cara melarutkannya pada 500 ml aquadest, larutan kemudian dikocok menggunakan *ultrasonic homogenizer* selama 1 jam. *Nata de coco* yang digunakan adalah nata yang berumur 3 hari. Gel *Nata de coco* kemudian direndam didalam larutan Ag dan TiO<sub>2</sub> selama 24 jam dan selanjutnya dikeringkan pada suhu ruangan sampai dengan kering ( $\pm 7$  hari). Metoda tersebut diperoleh hasil pengembangan percobaan di laboratorium.

Karakterisasi *nanofiber* yang dihasilkan dilakukan dengan mengamati beberapa parameter, diantaranya yaitu morfologi. Morfologi *nanofiber* dikarakterisasi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Alat yang digunakan adalah JEOL JSM-6510/LV/A/LA.

### Reaktor fotokatalitik

Reaktor didesain dalam skala laboratorium dengan dimensi 30 cm x 30 cm x 45 cm. Reaktor terbuat dari akrilat transparan. Lampu UV yang digunakan UV-C 4,5 W/m<sup>2</sup>, dengan panjang gelombang 365 nm. Gambar reaktor secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram skematis reaktor fotokatalitik

### Proses pengolahan limbah cair warna buatan

Metodologi yang digunakan belum pernah digunakan oleh peneliti sebelumnya, karena merupakan hasil dari pengembangan di laboratorium. Percobaan pengolahan limbah dengan metoda fotokatalitik SB/Ag/TiO<sub>2</sub> dilakukan terhadap air limbah warna tekstil buatan mengandung zat warna RB5.

Dilakukan percobaan dengan variasi pH dimulai dari 1, 3, 5, 7, 9, 11 dan 12. Pada penentuan pH optimum digunakan membran SB yang dilapisi Ag dan TiO<sub>2</sub> dengan jumlah awal 0,75 g dan 1 g masing-masing. Konsentrasi zat warna RB 5 yang digunakan yaitu 10, 30 dan 50 mg/l. Variasi penggunaan katalis yaitu *nanofiber* SB tanpa Ag dan TiO<sub>2</sub>, *nanofiber* dilapisi oleh Ag 1,42 mg/cm<sup>2</sup>, *nanofiber* dilapisi TiO<sub>2</sub> 3,21 mg/cm<sup>2</sup> dan *nanofiber* dilapisi Ag dan TiO<sub>2</sub> 3,85 mg/cm<sup>2</sup>.

Proses degradasi fotokatalitik dilakukan selama 120 menit dengan sistem aliran batch. Untuk melihat degradasi warna dilakukan pengambilan sampel tiap 15 menit kemudian dianalisa dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 610 nm. Nilai absorbansi yang diperoleh, diplotkan terhadap kurva kalibrasi zat warna RB5.

Konstanta laju reaksi dihitung berdasarkan persamaan pseudo-orde – satu di bawah ini, seperti ditunjukkan pada persamaan (1).<sup>14</sup>

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = kKt = k't \quad (1)$$

di mana  $r$  adalah laju reaksi (mg L<sup>-1</sup> menit),  $C_0$  adalah konsentrasi awal zat warna (mg L<sup>-1</sup>),  $C$  adalah konsentrasi zat warna pada waktu  $t$  (mg L<sup>-1</sup>),  $t$  adalah waktu irradiasi,  $k$  adalah konstanta laju reaksi (menit<sup>-1</sup>), dan  $K$  adalah koefisien adsorpsi (L mg<sup>-1</sup>).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Nanofiber SB/Ag/TiO<sub>2</sub>

*Nanofiber* yang digunakan diperoleh dari hasil percobaan pada studi sebelumnya, dengan metoda pelapisan menggunakan *nata de coco* berumur 3 hari (Gambar 3). *Nata de coco* yang telah dilapisi oleh Ag dan TiO<sub>2</sub> ditunjukkan pada Gambar 4.<sup>19</sup>

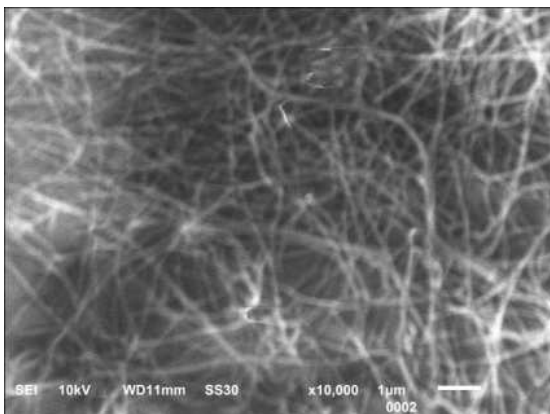
*Nanofiber* yang telah dilapisi Ag dan TiO<sub>2</sub> dianalisis morfologi permukaannya menggunakan SEM. Analisis SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi serat dari *nanofiber* selulosa bakterial dan nanopartikel. Berdasarkan Gambar 5 dapat dihitung diameter serat rata-rata *nanofiber* selulosa bakterial yaitu sebesar 80-100 nm. Begitu pula dengan ukuran pori berada pada rentang 80-200 nm.



**Gambar 3.** *Nata de coco* hasil fermentasi.<sup>19</sup>



**Gambar 4.** *Nanofiber* yang terlapisi nanopartikel Ag dan TiO<sub>2</sub>.<sup>19</sup>

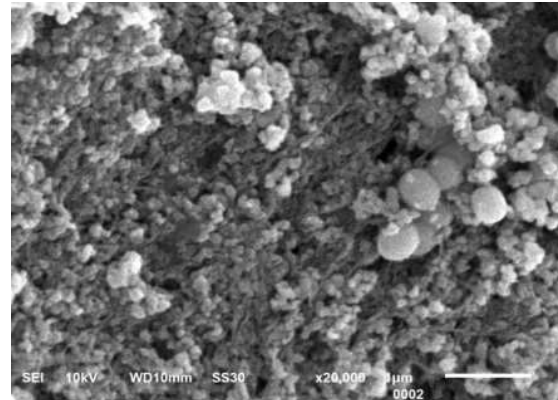


**Gambar 5.** Foto SEM *nanofiber* tanpa terlapisi Ag dan TiO<sub>2</sub>.<sup>19</sup>

Perlekatan nanopartikel Ag dan TiO<sub>2</sub> pada *nanofiber* SB menghasilkan struktur seperti tampak pada Gambar 6 pada perbesaran 20.000x. Struktur nanopartikel yang cukup rapat dipengaruhi dari lamanya proses *coating*. Ag dan TiO<sub>2</sub> yang digunakan berukuran <100 nm. Namun berdasarkan analisis pada gambar SEM menunjukkan

nanopartikel mengalami penggumpalan pada titik-titik tertentu. Agar tidak terjadi penggumpalan atau aglomerasi, diperlukan penambahan larutan penstabil pada saat pengadukan larutan Ag dan TiO<sub>2</sub>.

Setelah dilakukan proses pelapisan diperoleh lapisan tipis *nanofiber* yang kering, kemudian secara gravimetri dapat diketahui jumlah Ag dan TiO<sub>2</sub> yang melekat pada *nanofiber*. Jumlah Ag dan TiO<sub>2</sub> yang melekat pada *nanofiber* dapat dilihat pada Tabel 1.



**Gambar 6.** Foto SEM *nanofiber* 3 hari yang terlapisi nanopartikel Ag dan TiO<sub>2</sub>.<sup>19</sup>

**Tabel 1.** Jumlah Ag dan TiO<sub>2</sub> yang melekat pada permukaan *nanofiber*

<i>Nanofiber</i>	Jumlah nanopartikel (mg/cm <sup>2</sup> )
Tanpa Ag dan TiO <sub>2</sub>	-
Ag	1,42
TiO <sub>2</sub>	3,21
Ag dan TiO <sub>2</sub>	3,85

### Pengaruh pH

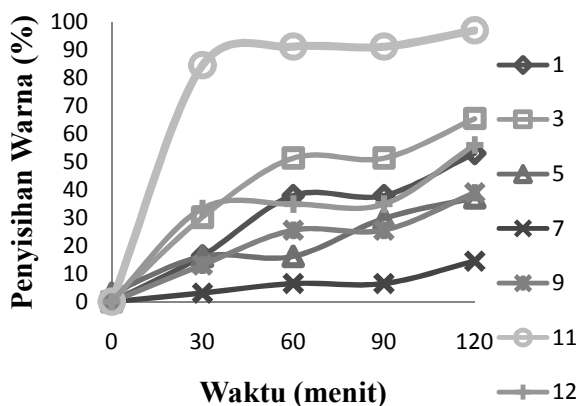
Parameter pH pada reaksi proses fotokatalitik merupakan parameter penting dalam penyisihan zat warna. Setiap zat warna memiliki pH optimum yang berbeda, tergantung pada jenis zat warna dan kondisi pada saat itu. Untuk mengevaluasi pengaruh pH terhadap aktivitas fotokatalitik, percobaan dekolonisasi zat warna RB5 dilakukan pada berbagai kondisi pH menggunakan SB/Ag/TiO<sub>2</sub>. Hasil dari percobaan ini ditampilkan pada Gambar 7, tampak penyisihan warna optimal terjadi pada pH 11 hingga mencapai 98,37% setelah irradiasi UV selama 2 jam. Setelah 2 jam irradiasi UV, dapat dibandingkan penyisihan warna pada pH 1, 3, 7, 9, 11 dan 12 masing – masing sebesar 65,2%, 77,8%, 37,1%, 20,7%, 49%, 98,4% dan 76,9%. Hasil ini menggambarkan aktivitas fotokatalitik dipengaruhi kondisi pH.

Percobaan dilakukan dengan mengukur absorbansi dari masing-masing variasi pH selama

120 menit dengan volume 200 ml dan konsentrasi zat warna RB 5 10 mg/l. pH optimum berada pada pH 11 dengan efisiensi penyisihan warna adalah 98,4%, maka kondisi pH pada percobaan yang selanjutnya berada pada pH 11. Hal tersebut serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk., (2003).<sup>20</sup>

Pada pH tinggi, radikal OH dapat dibentuk oleh reaksi antara ion hidroksida dan *hole* positif. Kehadiran ion hidroksida yang banyak dapat memudahkan dalam pembentukan radikal bebas. Berdasarkan hal tersebut, efisiensi penurunan warna akan terjadi seiring dengan bertambahnya radikal OH (pH basa). Pada pH diatas 6,25 muatan negatif pada permukaan TiO<sub>2</sub> bertambah dengan meningkatnya nilai pH.<sup>21</sup> Hal ini dapat menyebabkan gaya tolak-menolak antara partikel TiO<sub>2</sub> dengan OH<sup>-</sup> sehingga mencegah pembentukan radikal OH. Berdasarkan hasil penelitian, semakin meningkat nilai pH maka efisiensi penyisihan semakin besar. Hal tersebut berarti bahwa reaksi utama adalah serangan radikal OH yang dapat dicapai adalah pada pH tinggi.<sup>22</sup>

Pada kondisi sangat asam yaitu pH 2-4, terjadi penyisihan zat warna RB 5.<sup>23</sup> Hal ini mungkin disebabkan oleh interaksi elektrostatik antara muatan positif pada permukaan katalis dan pewarna anion sehingga terjadi adsorpsi molekul zat warna pada logam oksida.<sup>24</sup> Pada pH 7 memiliki efisiensi penyisihan paling rendah, hal tersebut disebabkan pada pH tersebut, TiO<sub>2</sub> berada pada zona titik nol yaitu berada pada daerah yang memiliki muatan negatif dan positif yang sama.<sup>25,26</sup>



**Gambar 7.** pH Optimum pada proses pengolahan air limbah warna tekstil menggunakan nanofiber SB/Ag/TiO<sub>2</sub>

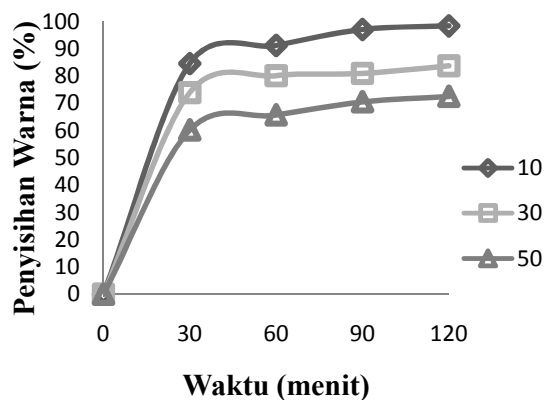
#### Degradasi Air Limbah Warna Tekstil Buatan

Pada proses degradasi zat warna, untuk meningkatkan laju penyisihan warna maka

diperlukan kondisi optimum pada saat proses pengolahan. Tingkat penghilangan warna tergantung pada kondisi operasi yang digunakan seperti jenis dan konsentrasi katalis, konsentrasi awal pewarna dan pH larutan.<sup>27</sup>

Pada percobaan ini telah dilakukan penyisihan limbah warna RB 5 dengan proses fotokatalitik. Degradasi fotokatalitik terhadap RB 5, menggunakan SB tanpa katalis, SB yang dilapisi Ag, SB yang dilapisi TiO<sub>2</sub>, SB yang dilapisi Ag dan TiO<sub>2</sub> dengan sistem *batch*. Dievaluasi pula pengaruh konsentrasi awal limbah terhadap penyisihan warna.

Semakin tinggi konsentrasi limbah, maka semakin tinggi tingkat kesulitan didalam mendegradasi limbah warna. Penyisihan warna tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal limbah 10 mg/L yaitu 98,4%, hal tersebut terjadi karena sinar foton lebih mudah mencapai permukaan nanofiber SB yang dilapisi Ag dan TiO<sub>2</sub> sehingga TiO<sub>2</sub> yang tersensitifkan Ag teraktivasi. Sehingga, radikal OH yang terbentuk lebih banyak dibandingkan dengan limbah yang memiliki konsentrasi lebih tinggi. Laju reaksi dekolourisasi pada konsentrasi 10 mg/L lebih cepat dibandingkan pada limbah konsentrasi tinggi (Gambar 8).



**Gambar 8.** Pengaruh konsentrasi awal pada penyisihan warna (pH 11)

Nilai laju reaksi dekolourisasi dapat dilihat pada Tabel 2. Konsentrasi limbah 10 mg/L mengalami laju reaksi lebih cepat dibandingkan dengan konsentrasi limbah yang lebih tinggi yaitu 30 dan 50 mg/L.

Dari hasil percobaan dapat dilihat bahwa nanofiber SB yang tidak dilapisi oleh katalis, dilapisi Ag dan dilapisi TiO<sub>2</sub>, memiliki nilai efisiensi penyisihan lebih rendah dibandingkan dengan membran yang dilapisi oleh gabungan antara Ag dan TiO<sub>2</sub>.

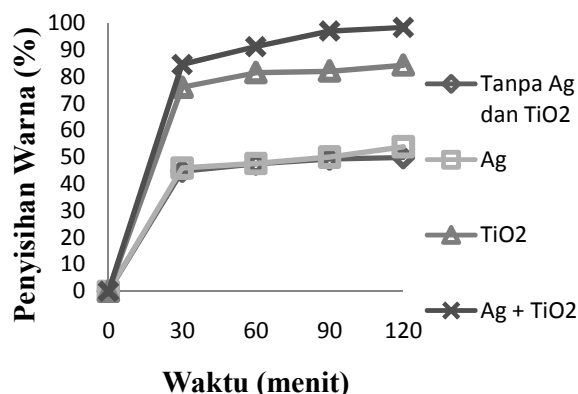
Nanofiber yang dilapisi Ag memiliki nilai efisiensi penyisihan warna optimum sebesar 53,9%

dan yang dilapisi  $\text{TiO}_2$  84,3%. Untuk membran yang dilapisi Ag dan  $\text{TiO}_2$  98,4%.

**Tabel 2.** Laju degradasi warna RB 5 pada pengaruh konsentrasi awal terhadap penyisihan warna (pH 11)

pH	$k'$	R2
10	0.033	0.954
30	0.013	0.736
50	0.009	0.758

Secara menyeluruh pada percobaan ini terjadi peningkatan efisiensi penyisihan warna dengan menggunakan membran SB/Ag/ $\text{TiO}_2$  dengan sistem *batch* (Gambar 9). Membran SB berfungsi sebagai pendukung/material tempat menempelnya Ag dan  $\text{TiO}_2$ , sehingga tidak ada kesulitan dalam memisahkan partikel katalis pada akhir proses.



**Gambar 9.** Degradasi fotokatalitik zat warna RB 5 dengan irradiasi UV

Katalis digunakan untuk meningkatkan efisiensi penurunan konsentrasi warna. Secara logis, semakin banyak konsentrasi katalis yang digunakan akan semakin besar efisiensi penurunan konsentrasi warna. Penambahan jumlah katalis sebenarnya meningkatkan jumlah bagian yang aktif pada permukaan fotokatalis sehingga meningkatkan jumlah radikal OH.

Dari proses pengolahan terjadi penyisihan warna yang sangat tinggi, pada proses tersebut terjadi reaksi fotoinduksi yang diakselerasi oleh adanya katalis yaitu  $\text{TiO}_2$ .<sup>9,10</sup> Reaksi ini diaktivasi oleh absorpsi foton dengan energi yang sama atau lebih tinggi dari energi celah pita/*band-gap* energi ( $E_{bg}$ ) katalis. Ketika katalis mengabsorpsi energi foton yang mencukupi dari radiasi UV (Gambar 1), elektron terpromosikan dari pita valensi ke pita konduksi menghasilkan pasangan lubang elektron. Elektron pada pita konduksi dan elektron pada pita

valensi. Keduanya dapat berpindah pada permukaan katalis, untuk melangsungkan reaksi redoks dengan spesies lain yang ada di permukaan. Dalam banyak kasus lubang mudah bereaksi dengan  $\text{H}_2\text{O}$  di permukaan untuk memproduksi radikal OH sedangkan elektron bereaksi dengan  $\text{O}_2$  untuk menghasilkan  $\text{O}_2^{\cdot-}$  (anion oksigen radikal superoksida). Reaksi ini mencegah kombinasi elektron dan lubang yang dihasilkan pada tahap pertama.  $\cdot\text{OH}$  dan  $\text{O}_2^{\cdot-}$  dihasilkan dengan cara di atas dapat bereaksi dengan zat warna untuk membentuk spesies lain dan kemudian bertanggung jawab untuk penyisihan zat warna.<sup>17</sup>

**Tabel 3.** Laju degradasi warna RB5 dengan irradiasi UV

	$k'$	R2
Tanpa Ag+ $\text{TiO}_2$	0.01	0.861
Ag	0.005	0.877
$\text{TiO}_2$	0.028	0.861
Ag+ $\text{TiO}_2$	0.033	0.954

Penggunaan logam mulia (Ag) dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Dalam aktivitas fotokatalitik, Ag membantu meminimalkan rekombinasi elektron dan lubang, dengan cara membantu mentransfer elektron pada permukaan  $\text{TiO}_2$  ke lingkungan dalam hal ini adalah limbah warna. Karena secara keseluruhan transfer elektron ke lingkungan adalah tahapan yang paling lambat. Dengan bantuan Ag laju fotokatalitik dipercepat serta rekombinasi berkurang.<sup>8</sup>

Reaksi penghilangan warna RB 5 dengan proses degradasi fotokatalitik dilakukan selama 120 menit. Hasil dekolonisasi tertinggi terjadi pada penggunaan membran SB dengan jumlah Ag dan  $\text{TiO}_2$  3,85 mg/cm<sup>2</sup> yang menghasilkan tingkat penyisihan sebesar 98,4%. Berdasarkan laju dekolonisasi katalitik ( $k'$ ) dapat dibandingkan juga bahwa *nanofiber* SB dengan jumlah  $\text{TiO}_2$  dan Ag masing-masing sebesar 1 g dan 0,75 g menunjukkan laju reaksi yang lebih cepat dibandingkan variasi membran lainnya yaitu sebesar  $3,3 \times 10^{-2}$  menit<sup>-1</sup> (Tabel 3).

## KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan, bahwa dari proses pengolahan terjadi penyisihan warna RB 5 pada kondisi optimum menggunakan membran SB/Ag/ $\text{TiO}_2$ . Proses yang terjadi adalah reaksi fotoinduksi yang diakselerasi oleh adanya katalis yaitu  $\text{TiO}_2$  serta penggunaan Ag yang mempercepat aktivitas fotokatalitik tersebut. Efisiensi penyisihan warna optimum diperoleh sebesar 98,4% dan laju dekolonisasi  $3,3 \times 10^{-2}$  menit<sup>-1</sup>. Proses degradasi fotokatalitik



optimum menggunakan *nanofiber* yang dilapisi katalis gabungan antara Ag dan TiO<sub>2</sub> sebesar 3,85 mg/cm<sup>2</sup>, konsentrasi warna RB 5 10 mg/L, diirradiasi di bawah intensitas lampu UV 4,5 W/m<sup>2</sup> selama 120 menit.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung (ITB) yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Riset dan Inovasi Kelompok Keahlian 2012.

## PUSTAKA

- <sup>1</sup> Sylwia, M., Antoni, W., Morawska, Masahiro, T. dan Michio, I. (2009). Application of anatase-phase TiO<sub>2</sub> for decomposition of azo dye in a photocatalytic membrane reactor, *Desalination*, 241, pp. 97-105.
- <sup>2</sup> Khalid, A., Batool, S., Siddique, T.M., Nazli, H.Z., Bibi, R., Mahmood, S., dkk. (2011). Decolorization of remazol black-B azo dye in soil by fungi, *Soil Environ.* 30, 1, pp. 1-6
- <sup>3</sup> Maness, P.C., Sharon, S., Daniel M.B., Zheng H., Edward, J.W. dan William, A.J. (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO<sub>2</sub> reaction: Toward an understanding of its killing mechanism, *Appl Environ Microbiol.*, 65, 9, pp. 4094-4098.
- <sup>4</sup> Sudrik, G.S., Maddanimath, T., Chaki, K.N., Chavan, P.S., Chavan, P.S., Sonawane, R.H., dkk. (2003). Evidence for the involvement of silver nanoclusters during the wolff rearrangement of  $\alpha$ -diazoketones, *Organic letters*, 5, 13, pp. 2355-2358.
- <sup>5</sup> Zhang, P.A. dan Sun, P.Y. (2004). Photocatalytic killing effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on Ls-174-t human colon carcinoma cells, *World J Gastroenterol*, 10, 21, pp. 3191-3193.
- <sup>6</sup> Zhou, G. dan Deng, J. (2007). Preparation and photocatalytic performance of Ag/ZnO nanocomposites, *Material Science in Semiconductor Processing*, 10, pp. 90-96.
- <sup>7</sup> Peng, W., Huang, B., Xiaoyan, Q., Xiaoyang, Z., Ying, D., Jiyong, W. dkk. (2008). Ag-AgCl: A highly efficient and stable photocatalyst active under visible light, *Angewandte Chemie International*, 47, pp. 7931-7933.
- <sup>8</sup> Kumar, V.R. dan Raza, G. (2009). Photocatalytic disinfection of water with Ag-TiO<sub>2</sub> nanocrystalline composite, *Ionics*, 15, pp. 579-587.
- <sup>9</sup> Akpan, U.G., dan Hameed, B.H. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts : A review, *Journal of Hazardous Materials*.
- <sup>10</sup> Rauf, M.A. dan Ashraf, S.S. (2009). Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution, *Chemical Engineering Journal*, 151, pp. 10-18.
- <sup>11</sup> Gunlazuardi, J. (2001). Fotokatalis pada permukaan TiO<sub>2</sub>, aspek fundamental dan aplikasinya, *Seminar Nasional Kimia Fisika II*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- <sup>12</sup> Hoffmann, M.R., Martin, S.M., Choi, W., dan Bahnemann, D.W. (1995). Environmental Application of Semiconductor Photocatalysis, *Chem Rev.*, 95, 69-96.
- <sup>13</sup> Horng, Y.R., Huang, C., Chang, C.M., Shao, H., Shiau, L.B. dan Hu, J.Y. (2009). Application of TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation and non-woven membrane filtration hybrid system for degradation of 4-chlorophenol, *Desalination*, 245, pp. 169-182.
- <sup>14</sup> Doh, S.J., Kim C., Lee, G.S., Lee, J.S., dan Kim, H. (2008). Development of photocatalytic TiO<sub>2</sub> nanofibers by electrospinning and its applications to degradation of dye pollutants, *Journal of Hazardous Materials*, 154, pp. 118-127.
- <sup>15</sup> Mahmoodi, M. N., Arami, M., Gharanjing, K., Nourmohammadian, F. dan Bidokhti, Y. A. (2008). Purification of Water Containing Agricultural Organophosphorus Pollutant Using Titania Nanophotocatalysis: Laboratory Studies and Numerical Modeling, *Desalination*, 230, 183-192.
- <sup>16</sup> Sugiyana, D. (2013). Degradasi Fotokatalitik Menggunakan Komposit *Nanofiber* Nanopartikel TiO<sub>2</sub> Terimmobilisasi Untuk Pengolahan Efluen IPAL Industri Tekstil, DISERTASI, Program Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- <sup>17</sup> Susanti (2012). Preparasi nanopartikel TiO<sub>2</sub>-anatase tersensitifkan perak (TiO<sub>2</sub>@Ag) untuk fotodegradasi metilen biru, MSc Thesis, Universitas Negeri Yogyakarta.
- <sup>18</sup> Gustiani, S. (2014). Pengolahan efluen IPAL industri tekstil menggunakan membran nanofiber selulosa bakterial dengan nanopartikel Ag dan TiO<sub>2</sub>, Disertasi S3, Institut Teknologi Bandung.
- <sup>19</sup> Indrarti, L. dan Yudianti, R. (1994). Struktur dan Sifat Mekanik dari Lapisan Tipis Bioselulosa, *Prosiding Seminar Ilmiah P3FT-LIPI*.
- <sup>20</sup> Wang, C., Yediler, A., Lienert, D., Wang, Z., and Kettrup, A. (2003). Ozonation of an azo dye C.I. Remazol Black 5 and toxicological assessment of its oxidation products, *Chemosphere*, 52, pp. 1225-1232.
- <sup>21</sup> Ahmed, S., Rasul, M. G., Martens, W. N., Brown, R. dan Hashib, M. A. (2011). Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater, *Water Air Soil Pollutant Review*, 213, pp. 3-29.
- <sup>22</sup> Gouvea, Carlos. A. K., Wypych, F., Moraes, S. G., Duran, N., Nagata, N. dkk. (2000). Semiconductor-assisted photocatalytic Degradation of Reactive Dyes in Aqueous Solution. *Chemosphere*, 40, pp. 433-440.
- <sup>23</sup> Enrico, M. S., Anabela, S. O., Thelma, P., Catia, G. M., Luis, F. V. F. dan Josino, C. M. (2011).

Use of titanium dioxide photocatalysis on the remediation of model textile wastewaters containing azo dyes, *Molecules*, 16, pp. 10370-10386.

<sup>24</sup>Sushil, K. K., Navjeet, K. dan Sukhmehar, S., (2009). Photocatalytic degradation of two commercial reactive dyes in aqueous phase using nanophotocatalysts, *Nanoscale Res Lett*, 4, pp. 709-716.

<sup>25</sup>Muruganandham, M., Sobana, N. dan Swaminathan, M. (2006). Solar assisted photocatalytic and photochemical degradation of Reactive Black 5, *J. Hazard. Mater*, 137, pp. 1371-1376.

<sup>26</sup>Dostanic J.M., Loncarevic D.R., Bankovic P.T., Cvetkovik O.G., Jovanovic D.M. dan Mijin D.Z. (2011). Influence of process parameters on the photodegradation of synthesized azo pyridine dye in TiO<sub>2</sub> water suspension under simulated sunlight, *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 46, pp.70-79.

<sup>27</sup>Kritikos, E.D., Xekoukoulotakis, P.N., Elefteria, P. dan Mantzavinos, D. (2007). Photocatalytic degradation of reactive black 5 in aqueous solution: Effect of operating conditions and coupling with ultrasound irradiation, *Water Research*. 41, pp. 2236-2246.

---